

令和元年6月21日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05027

研究課題名(和文)大強度ビームのための荷電変換入射方式における放射化の研究

研究課題名(英文) Research of radio-activation due to charge-exchange multi-turn beam injection with stripper foils for high intensity beam

研究代表者

吉本 政弘 (Yoshimoto, Masahiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：80414605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：荷電変換薄膜に400MeV H-ビーム入射時の荷電変換薄膜から放出される二次粒子を計測するための実験系をビーム調整用の100度ダンブラインに立ち上げ、二次粒子弁別計測のための計測手法を開発した。2種類のシンチレータを組み合わせることで陽子・中性子・ガンマ線を弁別できる放射線カウンタを開発し、MeV級の二次粒子(陽子及び中性子)の検出に成功した。また金属ターゲットを用いた放射化法において、MeV級の陽子及び中性子の弁別性能を実現するターゲット材及び生成核種の組み合わせを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二次粒子を利用した素粒子・原子核実験及び物質・生命科学実験において、実験時間の短縮や希少事象の発見の観点からビーム強度の増強が加速器に対して強く要求されている。本研究成果は、ビーム強度を制限している薄膜周辺の放射化抑制と更なるビーム強度の増強に貢献できる。また高速陽子及び中性子の放射化断面積のベンチマーク試験の観点から、施設の放射化に対する評価精度向上を実現することで、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The experimental system to measure the secondary particles emitted from the stripper foil during 400 MeV H- beam injection period has been established at the beam transport line forward 100-deg beam dump, and the measurement method to discriminate the kind or energy of secondary particles has been developed. Radiation counter, which is composed of two kinds of scintillators, can successfully detect and discriminate the MeV class secondary particles. In the radio-activation analysis method, the combination between the target materials and the radio-nuclides to estimate the kinds or energy of irradiating particles can be established.

研究分野：加速器ビーム物理

キーワード：大強度陽子加速器 荷電変換ビーム多重入射 放射化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本における J-PARC 3GeV シンクロトロン(RCS)や米国 SNS、英国 ISIS では、大強度陽子ビームを実現するための有効な手法として荷電変換薄膜を用いた荷電変換ビーム多重入射方式を採用している。先行研究において H-ビーム入射によるビーム損失と薄膜の耐久性に対して研究されてきたが、荷電変換入射による放射化については本研究以前には詳細な議論がなかった。J-PARC RCS では、ビーム強度の低いビームコミッション初期のころからビーム損失と残留線量について細心の注意を払いながら調整運転を進めおり、並行して空間電荷効果を考慮した多粒子シミュレーションコードを RCS に特化してチューニングを重ねることで、運動力学的要因によって生じるビーム損失についての原因をほぼ全て特定し、且つ抑制することに成功した。この成果から、入射部の残留線量測定結果に対してビーム損失毎に対応する放射化を分離整理することができ、同時に荷電変換入射による放射化を明らかにすることができた。結果はこれまで考えられていたよりはるかに大きく、ビーム出力 0.4MW の連続運転の段階で薄膜周辺での残留線量が最も高いところで 15mSv/h となっていた。この荷電変換薄膜周辺の放射化の原因を明らかにし、その対策を講じることは大強度陽子ビーム加速器における重大な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究を開始する前の詳細な残留線量調査や PHITS モンテカルロコードを用いた放射化シミュレーションから、荷電変換薄膜周辺の放射化は、一般的なビーム損失によるものとは異なり、ビーム照射による薄膜での核反応によって生成される二次粒子、特に中・低速の陽子及び中性子に由来していることを示唆していた。そこで、このことを実験的に明らかにすることを目的とし、(1)薄膜からの二次粒子計測のための実験環境の構築、(2)その実験環境で二次粒子の計測手法の開発、を行う。これらの成果を通して荷電変換入射による放射化のメカニズムを明らかにし、最終的には放射化抑制のための手法確立を目指す。

3. 研究の方法

(1)薄膜からの二次粒子を計測するためには、ビーム損失等による放射線といった多要因から隔離する必要がある。そこでビーム調整用 100 度ダンプのビームラインに、実機と同じ荷電変換薄膜を真空容器内に装填し遠隔でビームラインに導入できる薄膜導入機構と、薄膜へ入射されるビームからの二次粒子の角度分布を計測する為の計測ポートを有した二次粒子計測真空容器とで構成された新たな実験装置を設置した(図 1)。

(2)薄膜からの二次粒子計測における課題は、陽子及び中性子を他の放射線と区別して特定し、かつエネルギーを同定することである。そのため的手法として、放射線カウンタによる直接計測、金属ターゲットを用いた放射化法による間接計測、を並行して進めた。については、プラスチックシンチレータとスチルベンシンチレータを組み合わせることで、陽子、中性子、ガンマ線を弁別して計測できるカウンタの開発を進めた。開発に当たっては、Cf-252 中性子線源を用いたオフライン試験とごくわずかな中性子及びガンマ線が存在する RCS サブトンネル内での予備実験を進めてきた。については、本実験環境の構築と並行して、加速器本体の荷電変換薄膜周辺に銅ターゲットを配置し、Ge 半導体検出器を用いた放射化分析と PHITS によるシミュレーション比較による試験を実施した。

4. 研究成果

粒子弁別機能を有した放射線カウンタの中核が、中性子(n)とガンマ線(γ)とを区別して計測(n-弁別)するスチルベンシンチレータである。このシンチレータが数 100MeV 級の中性子を検出できるかが本研究での大きな課題であった。Cf-252 中性子線源用いたオフライン試験で n-弁別性能の確認をした後、RCS のサブトンネル内に設置して、n-弁別及びエネルギーレンジの確認のための予備実験を行った(図 2)。RCS サブトンネルは加速器トンネルの階下にあり、間のコンクリート遮蔽のためにほとんど全ての放射線は遮蔽されるが、わずかに中性子のみ漏れてくること、また漏れてきた中性子により発生するガンマ線が存在することが分かっていた。

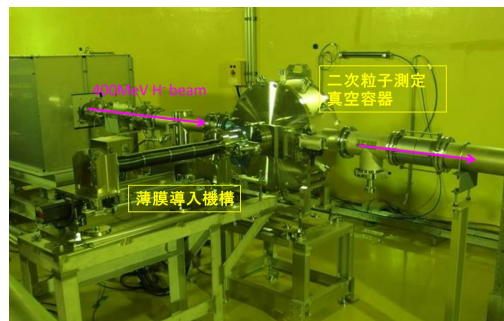


図 1 100度ダンプラインに新設した荷電変換薄膜由来の二次粒子測定装置

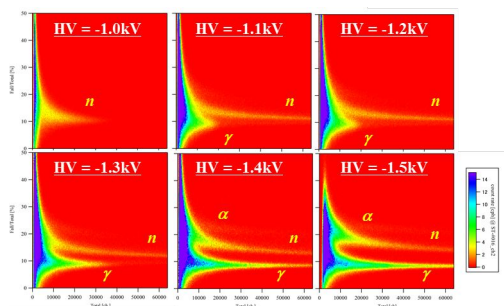


図 2 RCS サブトンネルでのスチルベンシンチレータによる n- 弁別の HV 特性

このような環境下での予備実験の結果、**スチルベンシンチレータで MeV 級中性子の観測を実現し、全波形をオフラインにて解析することで高い分解能で n- を弁別することに成功した。**また、図 2 の 6 つのグラフはシンチレータに取り付けた光電子増倍管に印加する電圧をパラメータにしたものである。印加電圧を上げることで測定粒子のエネルギー分布を低域側へとシフトでき、測定レンジの切り替えが容易にも出来ることも実証した。因みに、低エネルギー側で見えている 3 本目のラインは、スチルベンシンチレータのケースに使用しているアルミ材において $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ 反応で発生したアルファ線 () であり、本カウンタの分解能の高さを示している。予備実験で明らかになった計測パラメータを用いることで、今回構築した実験環境下で薄膜由来の二次粒子計測を行った。直下流にあるビームダンプからの放射線による影響を差し引いた薄膜由来の二次粒子をプロットした結果を図 3 に示す。**400MeV H⁻ビームを照射した荷電変換薄膜からの二次粒子を測定し、かつ n, p- の粒子弁別に成功した。**残る課題は中性子と陽子(p)の n-p 弁別である。この課題については中性子に対する応答がほとんど無いシンチレータとの組み合わせで、解決可能と考えている。

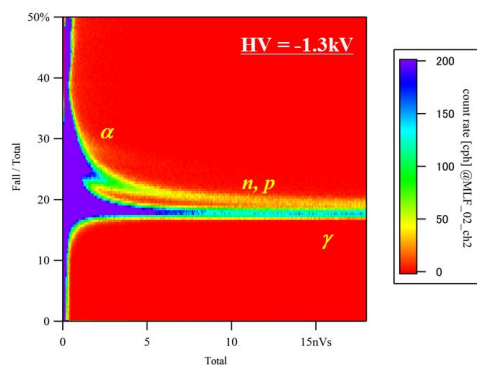


図 3 . 薄膜からの二次粒子計測結果

金属ターゲットによる放射化法を用いる場合、高エネルギーの陽子または中性子照射に対する明確な相違が困難であると予想されていた。この課題に対して、まずは PHITS シミュレーションを用いて、エネルギー毎の陽子または中性子照射によって銅、金、白金、チタン等の金属ターゲットの放射化の様子を調べた。結果は、生成核種によっては粒子種またはエネルギーによって生成量に大きな違いが出来ることが分かった。そこで、実機の荷電変換薄膜周辺の真空容器表面に厚さ 3mm の銅ターゲットを配置し、場所による生成核種の違いについて Ge 半導体検出器を用いて調べた。これは、これまでの先行研究の結果から荷電変換薄膜から放出される陽子及び中性子の生成量及びエネルギーは角度方向に大きな分布を持つことを考慮したものである。図 4 の測定結果に示す通り、測定場所によって生成核種の比率が核種によって大きく異なっていることが分かった。特に Sc-44 や Fe-59, Co-60 等は、PHITS を用いたシミュレーション結果でも、粒子種や照射エネルギーに生成量の変化が大きいため、弁別評価の指標として使える可能性があることを示唆していた。つまり、**実験及びシミュレーション双方から金属ターゲットを用いた放射化法により数 100MeV 級の陽子及び中性子の間接計測手法の確立に向けた可能性を得ることが出来た。**一方で、詳細な解析を進めた結果、実験とシミュレーションの結果は傾向としては合っているものの、完全な一致はしていないことが分かった。この原因は PHITS 内で使用している反応断面積等の問題、薄膜以外でのビーム損失による放射線の影響、金属ターゲットを設置した真空容器壁による影響等が考えられる。特に最後の真空容器壁は大きな課題で、そこで新たに生成された粒子 (三次粒子) が実験結果に不鮮明さを生じさせる主要原因と考えている。今回 100 度ダンプラインに設置した二次粒子測定装置には金属ターゲットを真空容器内に装填できるポートを 30 度毎に配置している。本実験装置を使えば、真空容器壁の影響を排除し、薄膜からの二次粒子を効果的に計測出来ると期待している。

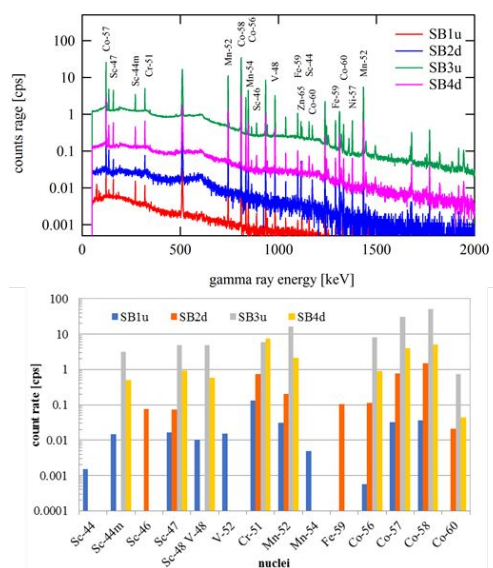


図 4 銅ターゲットを荷電変換薄膜周辺に配置した時の生成核種の比較

本研究での成果をまとめると以下ようになる。(1) 荷電変換薄膜から放出される二次粒子計測のための新たな実験環境をビーム調整ラインに設置した。(2) 二次粒子計測の手法として、粒子弁別機能を有した放射線カウンタによる直接計測法と金属ターゲットを用いた放射化法に依る間接計測法の開発を同時に進めた。前者に対しては、MeV 級の陽子・中性子に感度を持ち、粒子弁別機能を有するカウンタの開発に成功した。後者に対しては数 100MeV 級の陽子または中性子にたいする反応断面積の違いを示し、測定手法の確立に向けた手がかりを得ることが出来た。一方で、予算執行の遅れと装置開発の不具合が重なり実験装置の設置完了が 3 年目の夏期となったため、実験スケジュールが大幅に遅れた。しかし、実験環境の立ち上げ完了と二次粒子測定手法の確立に向けた目処が立ったことで本研究の初期目的は果たすことが出来たと考えている。今後は、本研究により開発した装置を活用して、引き続き二次粒子計測の実験を継続

している。今後は、本研究により開発した装置を活用して、引き続き二次粒子計測の実験を継続

し、二次粒子の定量評価と放射化メカニズムの解明を進める。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)

1. 吉本政弘、「J-PARC RCS における荷電変換薄膜からの二次粒子計測」、日本物理学会題 74 回年次大会、2019.3.14-17、九州大学伊都キャンパス(福岡市)
2. Masahiro Yoshimoto, "Measurement of Radio-activation and Evaluation of Activated Nuclides due to Secondary Particles Produced in Stripper Foil in J-PARC RCS.", International Nuclear Target Development Society Conference 2018, 2018.10.8-12, East Lansing (Michigan, USA).
3. Masahiro Yoshimoto, "Development of Secondary Particles Detection System With Stilbene Organic Scintillator in J-PARC RCS", The 7th International Beam Instrumentation Conference, 2018.9.9-13, Shanghai (China)
4. 吉本政弘、「J-PARC RCS における荷電変換薄膜からの2次粒子計測の開発状況」、第15回日本加速器学会年会、2018.8.8-10、ハイブ長岡(長岡市)
5. 吉本政弘、「J-PARC RCS における荷電変換薄膜からの二次粒子による放射化核種評価」、日本物理学会題 73 回年次大会、2018.3.22-25、東京理科大野田キャンパス
6. 吉本政弘、「荷電変換薄膜を用いた荷電変換ビーム多重入射に由来する放射化の抑制に向けた取り組みと課題」、第14回日本加速器学会年会、2017.8.1-4、北海道大学(札幌市)
7. 吉本政弘、「J-PARC RCS におけるビーム損失による放射化と残留線量分布測定」、日本物理学会第72回年次大会、2017.3.19、大阪大学豊中キャンパス(豊中市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：金正 倫計

ローマ字氏名：(Kinsho Michikazu)

所属研究機関名：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名：原子力科学研究部門 J - P A R C センター

職名：副ディビジョン長

研究者番号 (8桁): 10354747

研究分担者氏名: 岡部 晃大

ローマ字氏名: (Okabe Kota)

所属研究機関名: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名: 原子力科学研究部門 J - P A R C センター

職名: 研究副主幹

研究者番号 (8桁): 90437286

研究分担者氏名: 加藤 新一

ローマ字氏名: (Kato Shin-ichi)

所属研究機関名: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

部局名: 原子力科学研究部門 J - P A R C センター

職名: 博士研究員

研究者番号 (8桁): 20770605

分担者期間: 平成 28 年度 ~ 平成 29 年度

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。